

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Ким К.К.¹, Есин П.А.², Иванов С.Н.²

¹ ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения»,
г. Санкт-Петербург, Россия, kimkk@inbox.ru

² ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»,
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия, snivanov57@mail.ru

Аннотация — Показатели эффективности электротехнических установок непосредственно связаны с созданием и использованием новых составных материалов с заданными эксплуатационными свойствами. Практическое применение композитных материалов является одним из перспективных научно-технических направлений, обеспечивающих повышение эффективности электротехнических установок за счет герметизации токоведущих частей путем их защиты от воздействия внешней среды. Технические характеристики композитного материала соответствуют его структуре и зависят от свойств отдельных компонентов. Проверка соответствия параметров материала реализуется методами компьютерного анализа модели композитного материала в виде структуры, в которой отдельные элементы имеют термодинамические свойства соответствующей фазы состояния. При исследовании топологии отдельных элементов в структуре материала задается условными границами раздела в пределах исследуемого композита. Эффективность применения композитных материалов включает повышение класса электробезопасности, увеличение долговечности, снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт, расширение области применения установок.

Ключевые слова — эффективность применения, электротехнические установки, композитные материалы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Экономический анализ эффективности российских энергетических объектов показывает, что на единицу выпускаемой продукции расходуется в среднем в 2...4 раза больше энергоресурсов, чем в других индустриально развитых странах. При этом важно отметить, что возможность комплексного энергоресурсосбережения в первую очередь связана с минимизацией уровня затрат на его практическую реализацию. Главной причиной текущего состояния низкой эффективности электротехнических установок является старение основного энергетического оборудования, уровень которого по разным мнениям отстает от зарубежного на 30...40 лет.

По экспертным оценкам затраты на внедрение технологий энергосбережения почти в 4 раза меньше затрат на производство, распределение и транспортирование вырабатываемой энергии к местам потребления. То есть на практике в сложных экономических условиях стоит задача не увеличения новых мощностей, которые оказываются малоэффективными из-за низкого уровня используемых технологий и устаревшего оборудования, а в экономии энергии и повышении энергоэффективности.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ стратегии реализации программ энергосбережения показывает, что в первую очередь преимущественно должны внедряться не требующие крупных капиталовложений технические мероприятия. К таким мероприятиям относится модернизация того оборудования, на долю которого приходятся максимальные потери в энергетике, например, комплексы для транспортирования тепловой энергии, потери в которых зачастую превышают 50 %. Это подтверждает и сравнение различных энергосберегающих технологий, показывающее, что основное внимание должно быть сосредоточено на проблемах использования всех видов энергии с наименьшими потерями за счет повышения эффективности работы и энергетического совершенства в первую очередь оборудования для генерации, преобразования и транспортирования тепловой энергии.

Снижение потерь в таком оборудовании обеспечивает не только улучшение эксплуатационных характеристик (коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, весогабаритные параметры), но и характеристик, определяемых взаимодействием технических объектов с внешней средой – техносферной безопасности, системной энергоэффективности и совместимости. Повышение энергоэффективности оборудования возможно за счет совершенствования отдельных элементов, процессных или системных изменений, выбора программно-аппаратных средств управления, но также существенный результат достигается при повышении надежности электротехнических устройств.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности энергетических устройств является использование герметичных конструкций. Результаты исследования специальных герметичных электромеханических преобразователей, имеющиеся в настоящее время, подтверждают перспективность их использования [1]. Типичным примером такой разработки является герметичный электропривод переменного тока компрессорной установки мощностью 20 МВт для транспортировки с большой глубины сопутствующих газов, выпускаемый фирмой Siemens [2]. Эффективность устройства определяется наработкой, составляющей не менее 20 тысяч часов. Следует отметить, что в тяжелых условиях эксплуатации герметичные устройства - это

практически единственный реально работоспособный вариант приводного устройства, целесообразность которого обеспечивается высокой надежностью конструкции. Область применения электроприводов переменного тока герметичного исполнения включает как уже упомянутые компрессорные установки, так и технологические центрифуги, перемешивающие устройства, насосы, а также аппараты, которые должны обеспечивать полное отсутствие утечек реагирующих и загрязняющих компонентов в окружающую среду, работу с огнеопасными средами, эксплуатацию при высоких и низких давлениях и температурах.

Повышение энергоэффективности технических систем, использующих герметичное оборудование, также обусловлено возможностью увеличения электромагнитных нагрузок, а соответственно и использования электроприводов, за счет перехода к непосредственному охлаждению их элементов [3].

Практическая реализация таких электротехнических установок связана с разработкой и производством композиционных материалов с заданными физико-химическими характеристиками - одним из перспективных научно-технических направлений, затрагивающих стратегические интересы всех промышленно развитых стран. Повышение эффективности электротехнической установки обеспечивается герметизацией токоведущих частей за счет их капсулирования. Капсулирование состоит в том, что изоляция, например обмотки статора защищается от воздействия внешней среды посредством литой оболочки из композитного материала. Это позволяет обеспечить более высокий класс электробезопасности установки; увеличить ресурс; упростить конструкцию, повысить ее структурную надежность, снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт, расширить диапазон эксплуатационных режимов.

Технологической основой капсулирования является внедрение специальных процессов, обеспечивающих создание композитных материалов с заданными эксплуатационными свойствами. При этом сам технологический процесс существенно влияет на физико-химические характеристики композитов, зависящих от количественного и качественного состава образующих их структуру элементов.

Интегральные характеристики композитного материала определяются его структурой и свойствами отдельных составляющих. В случае отсутствия точной математической модели объекта исследования, которым является композитный материал, обеспечение его требуемых свойств может быть реализовано методами имитационного моделирования. Имитационная модель может быть построена на основе физического представления об объекте исследования. При этом физическая модель композитного материала сводится к высокодисперсной структуре, в которой отдельные элементы находятся в агрегатном состоянии, причем коллоидные частицы имеют термодинамические свойства соответствующей фазы состояния. Капсулирующий материал после процесса полимеризации является гетерогенным, характеризуется относительной нерастворимостью компонент, имеющих детерминированные границы раздела в пределах исследуемого объекта. Определение топологии

отдельных элементов в структуре материала, связано с решением уравнения Ван-дер-Ваальса, позволяющего учесть факторы межмолекулярного воздействия нехимического происхождения.

Следует отметить, что стоимость герметичных электротехнических установок выше стоимости однотипного оборудования обычного исполнения на 30 %, однако это в ряде случаев не является определяющим фактором вследствие экономического эффекта, достигаемого улучшением показателей надежности, безопасности и долговечности установки.

Капсулирование композитными материалами установок значительно увеличить интервалы технического обслуживания при одновременном увеличении времени наработки на отказ. По статистике компании HERMETIC-Pumpen GmbH среднее время наработки на отказ для циркуляционных насосов с экранированными электродвигателями составляет 7,5 лет, с традиционными – 2 года.

Электротехнические установки, использующие изоляционные композитные материалы, характеризуются более высокой электробезопасностью. Герметичное исполнение коробок выводов, кабельной проводки и других элементов не только исключает к ним доступ газа или жидкости, но и предотвращает выброс вредных веществ в атмосферу, что позволяет использовать их в пищевой или медицинской промышленности. Капсулирование позволяет обеспечить требуемый класс безопасности при работе в агрессивных или токсичных средах. Использование композитных материалов повышает устойчивость установки к механическим воздействиям и приводит к снижению уровней собственных вибраций и шума. Кроме этого, герметичные установки более компактны, что позволяет устанавливать их в труднодоступных местах.

III. ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ

Использование композитного материала в электромеханическом преобразователе переменного тока применительно к одному из самых распространенных электротехнических устройств – асинхронному двигателю с модифицированным короткозамкнутым ротором. Актуальность такого технического решения связана с использованием частотного управления, позволяющего не только эффективно регулировать скорость вращения, но и обеспечивать энергосберегающие режимы работы за счет оптимальных алгоритмов управления потреблением электроэнергии, использующих интеллектуальные технологии (нечеткая логика, нейронные сети, нейронечеткие подходы).

Применение композитных материалов расширяет область применения электротехнических устройств, в частности позволяет реализовать в одном устройстве режимы работы, связанные как с генерацией, так и транспортированием тепловой энергии – теплогенерирующих устройствах. Несмотря на конструкционное подобие обычным электрическим машинам переменного тока, теплогенерирующие устройства с композитным покрытием статора имеют ряд таких принципиальных отличий, как наличие неподвижного нагревательного элемента, закрепленного

на капсулированном статоре, и вращающегося полого немагнитного ротора, на котором закреплены напорные лопасти. Необходимость применения неподвижного нагревательного элемента обусловлена тем, что в режимах работы устройства близких к синхронным количество тепловых потерь, выделяющихся в роторе, в значительной степени уменьшается вследствие сближения скоростей вращения магнитного поля и ротора. Поэтому для обеспечения требуемой теплопроизводительности в конструкции устройства предусмотрен дополнительный источник, мощность тепловыделения несущественно зависит от механической скорости вращения ротора.

Использование композитного материала позволяет обеспечить малое гидравлическое сопротивление, обусловленное отсутствием вала и традиционных подшипниковых узлов. Следует отметить, что при отсутствии ферромагнитных элементов во внутренней расточке статора, теплогенерирующее устройство характеризуется значительным намагничивающим реактивным током и потребляемой мощностью, вызывающими существенный нагрев композитного материала. Величина тепловой нагрузки, испытываемой материалом, зависит от размерных соотношений внутреннего магнитопровода и величины воздушного зазора, непосредственно определяющих гидравлическое сопротивление проточной части устройства. Поскольку величина основного магнитного потока определяет магнитную индукцию и минимальную ширину зубца статора, толщина внутреннего магнитопровода ограничена снизу. В частности, для исследованного варианта устройства мощностью 2,2 кВт ширина зубца статора составляет приблизительно 4 мм, но магнитное сопротивление существенно снижается уже при толщине элемента 2 мм.

Более сложно определяется осевая длина внутреннего магнитопровода, так как она не только изменяет распределение магнитного поля во внутренней области устройства, но и изменяет процесс теплопередачи дополнительного источника тепловыделения вследствие изменения гидравлического сопротивления. Результаты исследования показали, что позволяют определить относительный диапазон, в котором достигается снижение сопротивления намагничивающего контура без существенного ухудшения теплоотдачи, составляет приблизительно 0,25...0,70 длины воздушного зазора.

При анализе электромагнитных процессов, определяющих эксплуатационные характеристики композитного материала, устройство можно представить в виде вращающегося преобразователя переменного тока с двумя вторичными обмотками: неподвижным и подвижным полыми роторами. Для описания электромагнитных процессов при неизменности распределения магнитного поля и потоков мощности реальный преобразователь, имеющий число витков первичной обмотки w_1 , вторичных обмоток w_2 и w_3 , заменяется эквивалентным с числом витков во вторичных обмотках, равным числу витков первичной обмотки, для инвариантности активной и реактивной составляющих мощности изменяются полные сопротивления вторичных обмоток.

Теоретически при заданном напряжении тока во всех электрических цепях определяются их полными

сопротивлениями, так первичная обмотка включает активное r_1 и индуктивное x_{1L} сопротивления, неподвижная вторичная обмотка – активное r'_2 , индуктивное x'_{2L} и емкостное x'_{2C} приведенные сопротивления, вращающаяся вторичная обмотка – приведенные активное r'_{3S} , индуктивное x'_{3L} и емкостное x'_{3C} сопротивления. Однако в реальных преобразователях толщина стенок полого немагнитного ротора во много раз меньше глубины проникновения электромагнитного поля, поэтому можно предположить, что индуктивное сопротивление рассеяния полых роторов x'_{2L} , x'_{3L} мало и вихревые токи при любых скольжениях распределяются по толщине стенок ротора практически равномерно, поэтому можно допустить, что приведенное активное сопротивление r'_{3S} не зависит от скольжения. Это позволяет приближенно найти нагрузочную составляющую потребляемого тока и электромагнитную мощность, передаваемую со стороны статора и обеспечивающую два процесса – нагрев теплоносителя дополнительным элементом и нагрев и транспортирование вращающимся ротором.

Механическая мощность устройства определяется плотностью мощности, воспринимаемой поверхностью ротора как произведение тангенциального механического напряжения на тангенциальную окружную скорость, и обеспечивает напор и производительность, а тепловая мощность, равная сумме всех тепловыделений – температуру теплоносителя. Очевидно, что для нахождения тепловой мощности необходимо определение электрических, магнитных и дополнительных потерь в преобразователе.

Синтез устройства и преобразователя частоты требует учета неравномерности распределения плотности тока по сечению проводников первичной обмотки из-за поверхностного эффекта. Поэтому определение электрических потерь по активному сопротивлению, полученному для одинаковой плотности тока по сечению, справедливо только для постоянных токов и токов малой частоты (порядка нескольких герц).

Неравномерность распределения тока зависит от величины поля рассеяния в пазу, силовые линии которого практически перпендикулярны оси паза, вследствие этого сцепление поля с элементами проводника, расположенными на одной высоте паза, определяет одинаковые индуктивные сопротивления таких элементов. В тоже время, индуктивные сопротивления элементов, находящихся на разной высоте паза, будут разными. Увеличение плотности тока происходит по мере приближения к поверхности паза, соответственно, полезное сечение уменьшается, а активное сопротивление возрастает. Для количественной оценки на практике используют коэффициент увеличения сопротивления обмотки вследствие поверхностного эффекта, зависящий от частоты тока и геометрии проводника.

Нахождение магнитных потерь требует учета технологических факторов, вида перемагничивания (пульсации или вращение поля) и добавочных составляющих. Практически для расчета потерь используются удельные магнитные потери, например измеренные экспериментально при частоте 50 Гц и индукции магнитного поля 1 Тл. Пересчет на другие

частоты и индукции требует разделения магнитных потерь на гистерезис, прямо пропорциональные частоте, и потери на вихревые токи, зависящие от квадрата частоты питающего напряжения.

Увеличение магнитных потерь из-за причин технологического характера учитывается эмпирическими коэффициентами технологических потерь для характерных частей магнитопровода. Суммарный коэффициент технологических потерь для ядра магнитопровода составляет 1,3...1,6, для зубцов 1,7...1,8. Добавочные магнитные потери, обусловленные несинусоидальностью от высших гармонических составляющих индукции, учитываются коэффициентом добавочных потерь (1,2...1,3).

Электрические потери в дополнительном нагревательном элементе являются основным источником нагрева рабочей среды. Аналитическое исследование электромагнитных полей с учетом его формы, закономерностей распределения токов и физических свойств сред предполагает ряд допущений: при анализе поля рассматриваются только первые пространственные гармонические намагничивающей силы; величина воздушного зазора во много раз меньше внешнего диаметра; плотность тока постоянна по толщине ротора; в распределении напряженности поля учитывается только нормальная составляющая; магнитная проницаемость стали равна бесконечности; индукция за пределами пакета статора равна нулю. Для обобщения поля в токовой и бестоковой областях вводится векторный потенциал, записываются уравнения Максвелла, а затем Лапласа для бестоковых областей и Пуассона для зоны вихревых токов. Из решения этих уравнений определяется векторный потенциал, поле и плотность вихревого тока. Электрическая мощность, выделяемая в нагревательном элементе, определяется действительной частью вектора Умова-Пойтинга.

Определение добавочных потерь связано с необходимостью учета влияния высших гармоник электромагнитного поля и токов вторичных цепей. Добавочные потери имеют место не только в неподвижном магнитопроводе, но и в маломagnetных элементах (вторичные обмотки, торцевые крышки и т.п.). Практически эти потери оцениваются приближенно, что с одной стороны обусловлено их относительно небольшими величинами, но в большей степени это связано с высокой сложностью их точного расчета. Потери, возникающие вследствие перемещения нагреваемой среды, подразделяются на гидравлические и механические. Точное определение этих потерь необходимо для нахождения температуры композитного материала. При инженерных расчетах эти потери учитываются коэффициентами, зависящими от конструктивных параметров и эксплуатационных факторов, аналогично расчету напорных характеристик вентиляторов, компрессоров или насосов. Для проверки полученных результатов и рекомендаций использован пакет Comsol Multiphysics, представляющий собой интерактивную среду для моделирования и расчетов задач, сводящихся к дифференциальным уравнениям в частных производных, методом конечных элементов.

При расчете магнитного поля использована двумерная модель магнитного поля переменных токов.

Задача сведена к дифференциальному уравнению в частных производных относительно комплексной величины z -компоненты векторного магнитного потенциала A . Их анализ подтверждает возможность использования композитных материалов для электротехнических устройств нагрева и транспортирования теплоносителя, обеспечивает достаточно стабильную результирующую температуру нагреваемой среды при номинальных напряжениях и частоте питающей сети и заданном коэффициенте теплоотдачи в диапазоне скольжений 0,4...0,9, который соответствует режиму работы преобразователя с высоким моментом сопротивления, возникающим при перемещении вязкой рабочей среды. При этом следует отметить, что полученные температурные зависимости, однозначно указывают на необходимость их учета на процессы теплообмена в капсулированном статоре, предельные температуры которого ограничиваются минимальным классом нагревостойкости композитных материалов [4].

IV. ВЫВОДЫ

Эффективность использования электротехнических установок непосредственно определяется не только величиной потерь в самих устройствах, но и уровнем их надежности. Вопросы надежности особенно в автономных комплексах крайне важны, поэтому по мере совершенствования производства повышение требований к надежности оборудования является обязательным. Сравнительный анализ показал очевидные преимущества применения композитных материалов для обеспечения требований безопасности и надежности. Применение электротехнических установок с использованием новых композиционных материалов позволяет снизить затраты на ремонт и восстановление, а в целом может рассматриваться как одно из мероприятий повышения их эффективности при инновационной модернизации промышленно-аграрных предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Иванов, С.Н. Эффективность энергетического оборудования / С.Н. Иванов // Приоритетные направления развития науки и технологий [Текст] : Доклады XX Международной научно-технической конференции. — Тула : Изд-во "Инновационные технологии", 2016. — С. 80-81.
- [2] Дурыманов В. В. На суше и под водой: капсулированный компрессорный агрегат STC-ECO компании Siemens / В. В. Дурыманов, С. А. Леонтьев, В. В. Седов // Турбины и дизели – 2010. – № 2. – С. 10-15.
- [3] Иванов, С.Н. Эффективность надежности электроэнергетических систем / С.Н. Иванов, А.А. Скрипильев // Ученые записки КнАГТУ – 2016. – № III-1(27). – С. 20-26.
- [4] Иванов, С.Н. Электромеханические генераторы тепловой энергии / К.К. Ким, С.Н. Иванов. – Издательство LAP (LAMBERT Academic Publishing), 2011. – 352 с.